

DESAIN *STONE COLUMN* UNTUK MITIGASI POTENSI LIKUIFAKSI DI KEPULAUAN TIDORE, MALUKU UTARA

Stone Column Design for Mitigation of Liquefaction at Tidore Island, North Maluku

Danang Prasajo¹ dan Dr.Ir. Hendriyawan, MT²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung, 40123

¹danangprasajo30@gmail.com dan ²hendriyawan@ocean.itb.ac.id

ABSTRAK

Fenomena gempa bumi dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi tanah. Likuifaksi adalah fenomena berkurangnya kekuatan geser tanah yang menyebabkan tanah berperilaku seperti fluida yang tidak memiliki kapasitas geser (sangat kecil). Analisis yang dilakukan adalah analisis kualitatif dan juga analisis kuantitatif. Analisis kualitatif adalah analisis yang dilakukan dengan mengamati karakteristik lokasi tanah, bisa dengan data gempa di masa lampau dan juga dari karakteristik tanah. Apabila pada analisis kualitatif tidak ditemukan potensi likuifaksi, maka tidak perlu dilakukan analisis kuantitatif. Namun apabila terdapat potensi likuifaksi pada analisis kualitatif, perlu dilakukan analisis kuantitatif. Apabila berdasarkan kedua analisis tanah di lokasi studi berpotensi likuifaksi perlu dilakukan evaluasi tingkat keruntuhan atau kegagalan tanah akibat likuifaksi yang akan terjadi menggunakan metode *Liquefaction Potential Index* (LPI), sehingga dapat ditentukan besar kedalaman tanah yang harus diperbaiki dan metode yang akan digunakan. Salah satu metode yang cukup efektif untuk memitigasi keruntuhan akibat likuifaksi ini adalah metode *vibroreplacement* (biasa disebut *stone column*). Dalam proses desain *stone column* menggunakan tiga metode untuk mengevaluasinya antara lain: metode Priebe (1995), metode Baez & Martin (1993), metode Baez (1995). Dalam studi ini akan dilakukan proses desain *stone column* untuk mitigasi potensi terjadinya likuifaksi di Kepulauan Tidore, Maluku Utara.

Kata kunci: Likuifaksi, *Liquefaction Potential Index*, *stone column*, Kepulauan Tidore

PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia mencakup daerah-daerah yang mempunyai tingkat resiko gempa yang tinggi diantara beberapa daerah gempa diseluruh dunia, hal ini disebabkan karena wilayah kepulauan Indonesia berada di antara 4 (empat) sistem tektonik yang aktif. Yaitu tapal batas lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, lempeng Filipina dan lempeng Pasifik.

Dengan visi maritim Indonesia, pembangunan infrastruktur ke arah laut akan semakin besar seperti pembuatan pulau reklamasi untuk budidaya, maka dari itu diperlukan identifikasi terhadap bahaya-bahaya yang dapat disebabkan oleh bencana terhadap infrastruktur yang akan dibangun seperti gempa. Fenomena yang dapat terjadi akibat gempa antara lain; kegagalan struktur,

likuifaksi, tanah longsor, dan gelombang tsunami.

Fenomena likuifaksi dapat menyebabkan kerusakan yang sangat parah apabila tidak dilakukan tindakan-tindakan preventif sebelumnya. Salah satu contoh dari gempa yang mengakibatkan terjadinya likuifaksi adalah kerusakan-kerusakan yang dihasilkan selama gempa bumi Bengkulu 2000, gempa bumi Aceh 2004, gempa bumi Nias 2005 dan gempa bumi Yogyakarta 2006 (Eko dkk, 2009).

Likuifaksi adalah fenomena berkurangnya kekuatan geser tanah yang menyebabkan tanah berperilaku seperti fluida yang tidak memiliki kapasitas geser (sangat kecil). Likuifaksi umumnya terjadi pada daerah dengan komposisi tanah pasir lepas dan

berada dalam kondisi *undrained*, meskipun dalam beberapa kasus terjadi pula pada tanah lempung selama syarat terjadinya likuifaksi terpenuhi.

Fenomena likuifaksi dapat membawa dampak yang cukup serius terhadap struktur di atasnya. Untuk kondisi gempa yang cukup besar dengan kerentanan likuifaksi yang cukup tinggi dapat menyebabkan struktur yang berada di atasnya kehilangan daya dukungnya dan struktur akan gagal.

Rentang konsekuensi yang disebabkan oleh fenomena likuifaksi ini sangatlah lebar, sehingga pendekatan secara konservatif, seperti mengganti keseluruhan tanah dengan tanah yang tidak rentan terlikuifaksi akan menyebabkan biaya konstruksi yang sangat tinggi dan menyebabkan pembangunan infrastruktur menjadi tidak ekonomis. Rekayasa yang baik sangat dibutuhkan untuk mendapatkan desain yang optimum.

Metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan antara lain adalah *vibroreplacement* (*stone column*), *deep dynamic compaction*, *compaction grouting*, *deep soil mixing*, dan *soil replacement*. Metode yang cukup populer digunakan untuk mitigasi likuifaksi adalah *vibroreplacement* (*stone column*) dikarenakan dapat digunakan pada berbagai jenis tanah dan biaya yang digunakan relatif lebih rendah dari yang lain.

Stone column adalah metode pemadatan tanah menggunakan teknik getaran dengan sekaligus mengganti sebagian tanah yang berpotensi likuifaksi dengan tanah yang lebih baik (biasanya *gravel*). Dalam konteks mitigasi terjadinya likuifaksi, desain *stone*

column dievaluasi terhadap efeknya meningkatkan konsentrasi tegangan pada tanah.

Evaluasi tingkat keruntuhan atau kegagalan tanah akibat likuifaksi yang akan terjadi menggunakan metode *Liquefaction Potential Index* (LPI), sehingga dapat ditentukan besar kedalaman tanah yang harus diperbaiki dan metode yang akan digunakan. Salah satu metode yang cukup efektif untuk memitigasi keruntuhan akibat likuifaksi ini adalah metode *vibroreplacement* (biasa disebut *stone column*).

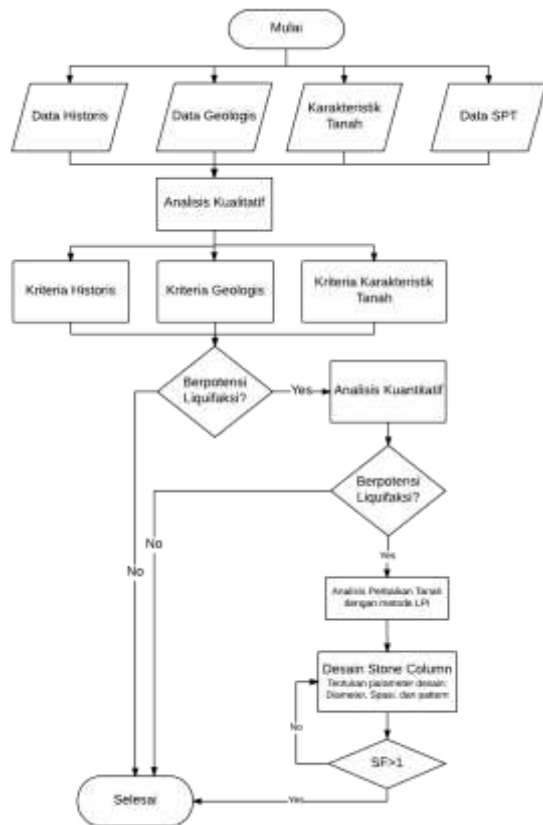
Dalam proses desain *stone column* menggunakan tiga metode untuk mengevaluasinya antara lain: metode Priebe (1995), metode Baez & Martin (1993), metode Baez (1995) sehingga didapatkan desain *stone column* yang paling optimum untuk mengatasi potensi kerusakan yang akan terjadi akibat likuifaksi. Dalam studi ini akan dilakukan proses desain *stone column* untuk mitigasi potensi terjadinya likuifaksi di Kepulauan Tidore, Maluku Utara seperti ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Peta Provinsi Maluku Utara (Google Earth, 2017)

Metodologi dan Teori

Metodologi yang digunakan dalam studi ini seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Metodologi studi desain *stone column* untuk mitigasi likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi secara kualitatif meliputi analisis menggunakan kriteria historis, kriteria geologis, dan kriteria karakteristik tanah. Berdasarkan penelitian pasca-gempa, ditemukan bahwa likuifaksi sering terjadi pada lokasi yang sama jika kondisi tanah tidak berubah (Youd, 1984a). Jarak dimana likuifaksi dapat terjadi meningkat seiring dengan meningkatnya kekuatan gempa. Grafik tersebut tidak menjamin likuifaksi tidak dapat terjadi pada jarak yang lebih jauh dari 500 km namun grafik ini dapat digunakan pada lingkup daerah yang lebih kecil. Persamaan grafik tersebut (Ambraseys, 1988) ditunjukkan oleh persamaan (1).

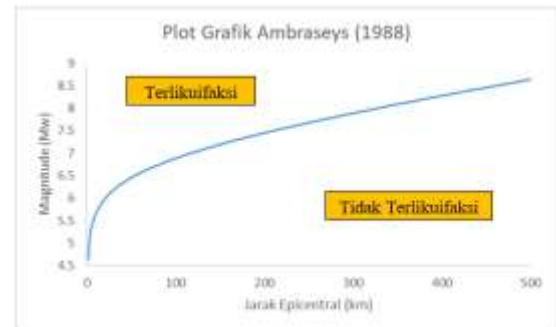
$$M_w = -0.31 + 2.65 \times 10^{-8} R_e + 0.99 \log(R_e) \quad (1)$$

dimana:

M_w = besar gempa yang terjadi

R_e = Jarak episentral gempa (cm).

Persamaan 1 diplotkan kedalam grafik seperti ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2 Batasan likuifaksi untuk kriteria historis

Tanah yang rentan terhadap likuifaksi terbentuk pada lingkungan geologis yang cenderung sempit (Youd, 1991). Karakteristik endapan, hidrologis, dan umur endapan mempengaruhi kerentanan tanah terhadap likuifaksi (Youd and Hoose, 1977). Untuk memudahkan analisis kriteria, berdasarkan hasil penelitiannya Youd (1978) memberikan sebuah tabel yang menyajikan hubungan antara jenis endapan berdasarkan umurnya, kedalaman, dan tingkat kerentanannya terhadap likuifaksi ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Potensi Likuifaksi Berdasarkan Umur Endapan Tanah (Youd et al., 1978)

Umur Endapan tanah	Kedalaman muka air tanah (ft)		
	0-10	10-30	>30
Holosen Baru	Tinggi	Rendah*	Tidak Rentan
Holosen Lama	Sedang	Rendah	Tidak Rentan
Pleistosen Akhir	Rendah	Tidak Rentan	Tidak Rentan

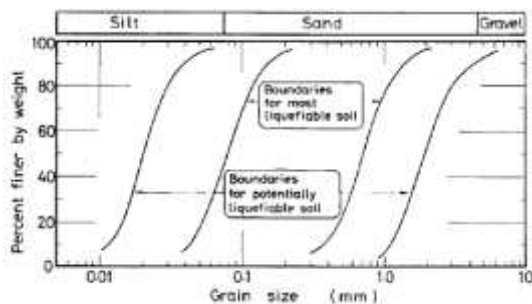
*Holosen baru pada daerah yang diteliti (San Fernando Valley) tidak pernah melebihi 10 ft. Endapan jenuh pada kedalaman 10-30 ft termasuk dalam holosen lama.

Proses geologis yang menghasilkan tanah dengan butiran partikel yang seragam dan mengendapkan tanah pada kondisi tidak rapat akan menghasilkan tanah yang rentan mengalami likuifaksi. Sehingga tanah fluvial, colluvial, dan aeolian pada kondisi jenuh akan cenderung rentan terhadap likuifaksi.

Karakteristik komposisi tanah dan perubahan volume tanah yang tinggi sering dikaitkan dengan kerentanan tanah terhadap likuifaksi yang tinggi. Tanah dengan partikel halus yang memenuhi kriteria dari Cina Wang (1979) di bawah ini dapat dianggap rentan terhadap kehilangan kekuatan tanah:

- Jumlah partikel berdiameter partikel lebih halus dari $0.005 \text{ mm} \leq 15\%$
- *Liquid Limit*, $LL \leq 35\%$
- Kandungan air $\geq 0.9 LL$
- Indeks likuiditas ≤ 0.75

Kerentanan tanah juga dipengaruhi oleh gradasi partikel tanah. Untuk memudahkan analisis Tsuchida (1970) membuat kurva batasan gradasi untuk melakukan analisis kerentanan terhadap likuifaksi seperti ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3. Kurva batasan gradasi untuk klasifikasi tanah rentan likuifaksi dan tidak rentan likuifaksi. (Liquefaction of Soils during Earthquake, 1985)

Metode yang akan digunakan untuk menentukan potensi terjadinya likuifaksi adalah prosedur menggunakan Metode *Simplified Seed* yang digagas oleh Idriss & Boulanger (2010). Dalam melakukan analisis terhadap potensi terjadinya likuifaksi digunakan parameter perbandingan antara *cyclic stress ratio* (CSR) dan *cyclic resistance ratio* (CRR) dari tanah akibat terjadinya gempa.

Cyclic Stress Ratio (CSR) merupakan sebuah variabel yang digunakan untuk

mendefinisikan gejala kegempaan yang terjadi pada lapisan tanah. CSR pada kedalaman tertentu bisa dirumuskan oleh Seed dan Idriss (1971) seperti yang ditunjukkan persamaan (2).

$$CSR = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (2)$$

dimana:

τ_{max} = tegangan geser maksimum akibat gempa

σ'_v = *overburden stress* efektif pada kedalaman yang ditinjau (*overburden stress* total dikurangi tekanan air pori)

σ_v = *overburden stress* total pada kedalaman yang ditinjau

a_{max} = *peak horizontal ground acceleration*

g = percepatan gravitasi

Nilai r_d merupakan faktor reduksi tegangan pada suatu kedalaman yang dirumuskan untuk mengestimasi besarnya koefisien reduksi besaran CSR ditunjukkan oleh persamaan (3).

Untuk kedalaman (z) ≤ 34 meter,

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M) \quad (3)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (4)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (5)$$

Untuk kedalaman (z) > 34 meter,

$$r_d = 0.12 \exp(0.22M) \quad (6)$$

z = kedalaman dibawah permukaan tanah (meter)

M = besarnya gempa.

Cyclic resistance ratio (CRR) merupakan parameter yang menunjukkan ketahanan tanah yang berhubungan dengan nilai SPT (jumlah pukulan per 30 cm). Nilai SPT dari

data harus dilakukan koreksi sebelum digunakan untuk mendapatkan nilai CRR. Standar untuk jumlah pukulan untuk mendapatkan nilai SPT $(N_1)_{60}$ untuk setiap *hammer* memiliki efisiensi 60%. Untuk mengoreksinya digunakan persamaan (7).

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (7)$$

dimana:

$(N_1)_{60}$ = nilai SPT yang telah dikoreksi dengan efisiensi pukulan 60%

N_m = jumlah pukulan pada prosedur SPT

C_E = koreksi energi

C_E didapat dari persamaan (8).

$$C_E = \frac{ER_m}{60\%} \quad (8)$$

ER_m = Rasio energi pemukul (dalam %)

C_B = koreksi diameter *borehole* (**Tabel 2**)

Tabel 2. Koreksi Diameter Borehole

(Idriss & Boulanger, 2010)

Borehole Diameter	Nilai C_B
65-115 mm	1
150 mm	1.05
200 mm	1.15

C_R = koreksi panjang batang bor (**Tabel 3**)

Tabel 3. Koreksi Panjang Batang Bor

(Idriss & Boulanger, 2010)

Rod Length	Nilai C_R
< 3 m	0.75
3-4 m	0.8
4-6 m	0.85
6-10 m	0.95
10-30 m	1.00

C_S = koreksi metode *sampling* (**Tabel 4**)

Tabel 4. Koreksi Metode *Sampling* (Idriss & Boulanger, 2010)

Standar <i>sampling</i>	Nilai C_S
Standar/with liners	1
Without liners	1.1 – 1.3

C_N = faktor koreksi tegangan efektif

C_N didapat dari persamaan 9.

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^m \leq 1.7 \quad (9)$$

dimana,

$$m = 0.784 - 0.0768 \sqrt{(N)_{60}} \quad (10)$$

$$(N)_{60} = N_m \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (11)$$

P_a = tekanan atmosfer = 100 kPa

Karena dasar analisis adalah untuk pasir murni, maka perlu ada ekivalensi untuk nilai SPT $(N_1)_{60cs}$ untuk tanah yang tak memiliki kohesi, persamaan ini digagas oleh Idriss dan Boulanger (2004, 2008).

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (12)$$

$\Delta(N_1)_{60}$ yang merupakan penambahan NSPT karena memperhitungkan *finest content*. $\Delta(N_1)_{60}$ dihitung dengan memperhitungkan efek dari *fine content* (FC) pada CRR seperti ditunjukkan persamaan (13).

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \left(\frac{9.7}{FC+0.01} \right) - \left(\frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right) \quad (13)$$

FC = *finest content* (kandungan butiran halus atau pasir dalam %)

CRR juga berkorelasi terhadap durasi dari getaran yang disebabkan oleh gempa yang dinyatakan dalam *earthquake magnitude scaling factor* (MSF) dan *overburden stress* efektif yang dinyatakan dengan *overburden correction factor* K_σ . Nilai CRR dikembangkan dari kondisi $M=7.5$ dan $\sigma'_v = 1$ atm dihitung dengan persamaan (14).

$$CRR_{M=7.5; \sigma'_{v0}=1} = \exp \left\{ \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} \right) + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right\} \quad (14)$$

Koreksi terhadap nilai M dan K_σ dinyatakan pada persamaan (15).

$$CRR_{M; \sigma'_{v0}} = CRR_{M=7.5; \sigma'_{v0}=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (15)$$

MSF (*magnitude scaling factor*) merupakan nilai kekuatan gempa yang menyebabkan likuifaksi. Rumusan MSF didekati dengan persamaan (16).

$$MSF = 6.9 \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (16)$$

K_σ (*Overburden correction factor*), koreksi ini digagas Boulanger (2003). Kemudian Idriss dan Boulanger (2008) menggagas sebuah persamaan yang menghubungkan antara $(N_1)_{60cs}$ dan K_σ seperti yang ditunjukkan persamaan (17).

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right) \leq 1.1 \quad (17)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (18)$$

Setelah didapatkan kedua parameter yaitu CSR dan CRR dapat ditentukan faktor keamanan (FS) untuk menentukan potensi awal terjadinya likuifaksi secara kuantitatif seperti ditunjukkan oleh persamaan (19).

$$FS = \left(\frac{CRR_{M; \sigma'_{v0}}}{CSR} \right) \quad (19)$$

dimana,

CRR = *Cyclic Resistance Ratio*

CSR = *Cyclic Stress Ratio*

Likuifaksi akan terjadi apabila nilai $FS \leq 1$, dan tidak terjadi ketika $FS > 1$.

Setelah dilakukan analisis potensi likuifaksi dengan metode *Simplified Seed* terdapat sebagian lapisan yang mengalami likuifaksi dan tidak mengalami likuifaksi, maka dari itu untuk memitigasi likuifaksi diperlukan evaluasi terhadap potensi terjadinya likuifaksi. Evaluasi yang akan dilakukan menggunakan konsep *Liquefaction Potential Index* (I_L) yang dikembangkan

oleh Iwasaki et al. (1978) seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (20).

$$I_L = \int_0^{20} FW(z) dz \quad (20)$$

dimana:

I_L = *Liquefaction Potential Index*

F = *Safety Factor* yang telah

dikoreksi

$W(z)$ = Faktor kedalaman

Nilai F didapatkan dari persamaan (21) dan (22).

$$F = 1 - FS \text{ untuk } FS < 1 \quad (21)$$

$$F = 0 \text{ untuk } FS > 1 \quad (22)$$

FS = *Safety Factor* didapat dari analisis kuantitatif dengan metode *Simplified Seed*
Nilai $W(z)$ didapatkan menggunakan (23).

$$W(z) = 10 - 0.5z \quad (23)$$

z = kedalaman yang ditinjau

Berdasarkan data empiris yang dianalisis oleh Iwasaki et.al (1984) didapatkan bahwa semakin besar nilai I_L semakin tinggi pula potensi kerusakan akibat terjadinya likuifaksi seperti ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Potensi kerusakan akibat terjadinya likuifaksi

Resiko Likuifaksi	Sangat Rendah	Rendah	Tinggi	Sangat Tinggi
I_L	0	$0 < I_L \leq 5$	$5 < I_L \leq 15$	$I_L > 15$

Batasan nilai tersebut dianggap cukup memadai digunakan sebagai dasar untuk menentukan resiko kerusakan akibat likuifaksi.

Dalam proses menentukan metode mitigasi yang dilakukan perlu dilihat tingkat kegagalan dari tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi.

Dengan menggunakan pendekatan probabilitas terhadap metode LPI menggunakan data empirik David et.al

(2006) menggagas batasan kegagalan pada tanah yang mengalami likuifaksi yang dinyatakan dalam rumusan persamaan 24.

$$P_G = \frac{1}{(1+e^{4.90-0.73I_L})} \quad (24)$$

dimana:

P_G = probability of ground failure

Tanah tidak mengalami kegagalan apabila nilai $P_G \leq 0.1$, dengan batasan tersebut maka untuk menurunkan nilai LPI tanah, maka lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi harus diperbaiki hingga mencapai nilai $I_L \leq 3.7$.

Perbaikan tanah yang dapat dilakukan untuk mitigasi likuifaksi antara lain: *vibroreplacement*, *deep dynamic compaction*, *compaction grouting*, *deep soil mixing*, dan *soil replacement*. Masing-masing metode tersebut memiliki batasan yang ditunjukkan oleh Tabel 6.

Tabel 6. Batasan Masing-Masing Metode Perbaikan Tanah

Metode	Jenis Tanah	Kedalaman efektif (m)
<i>Vibroreplacement</i>	Pasir berlempung, lempung berpasir	$z < 30$
<i>Dynamic compaction</i>	Pasir, pasir berlempung	$9 < z < 12$
<i>Compaction grouting</i>	Pasir lepas	$6 < z$
<i>Soil Mixing</i>	Hampir semua jenis tanah	$z < 20$
<i>Soil Replacement</i>	Semua jenis tanah	$z < 5$

Dalam proses mendesain *stone column*, parameter yang diperlukan antara lain;

- Diameter (D): besar diameter *stone column* yang biasa digunakan berkisar antara 800-1500 mm.
- Kedalaman: besar kedalaman ditentukan berdasarkan sejauh mana kedalaman tanah yang harus diperbaiki yang akan berkontribusi terhadap kegagalan tanah akibat likuifaksi.
- Pattern : *stone column* biasanya didesain dengan *pattern equilateral triangular* (segienam) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4, *pattern segiempat* juga dapat digunakan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.
- Spasi (s): dalam proses desain *stone column* berbeda satu tempat dengan yang

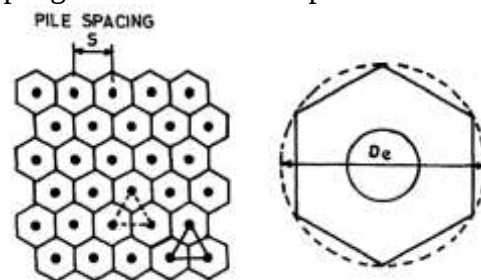
lain bergantung dari kondisi masing-masing lokasi.

e. Diameter Ekuivalen (D_e): merupakan *tributary area* yang terbentuk disekeliling *stone column*. Nilai D_e didekati dengan luasan lingkaran yang ditunjukkan Gambar 4 dan 5. D_e dapat dihitung dengan persamaan 25 (*equilateral triangular pattern*) dan persamaan 26 (*square pattern*)

$$D_e = 1.05 S \quad (25)$$

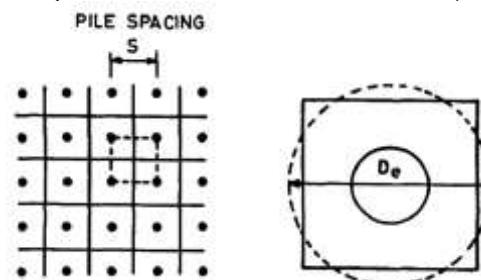
$$D_e = 1.13 S \quad (26)$$

nilai diameter ekuivalen ini akan menjadi dasar penghitungan luasan tanah yang terpengaruh *stone column* per unit cell.



Gambar 4. Equilateral triangular pattern

(Sumber: IS-15284(2003): Design and construction for ground improvement - Guidelines, Part 1: Stone columns)



Gambar 5. Square pattern

(Sumber: IS-15284(2003): Design and construction for ground improvement - Guidelines, Part 1: Stone columns)

- Replacement Ratio (A_r): analisis dalam perencanaan *stone column* cukup rumit karena perbaikan dilakukan untuk daerah yang sangat luas dengan jumlah *stone column* yang sangat banyak pula. Untuk itu, dalam analisis dapat disederhanakan menjadi unit-unit sel dengan luasan sebesar A yang dianggap terdiri dari satu kolom dengan penampang A_c dan dianggap mempengaruhi tanah disekitarnya digunakan parameter A_r seperti ditunjukkan persamaan 27.

$$A_r = \frac{A_c}{A} \quad (27)$$

g. Material Pengisi: agregat yang biasa dipakai adalah *gravel* dengan diameter antara 6-40 mm.

Dalam konteks mitigasi terjadinya likuifaksi, desain *stone column* dievaluasi terhadap efeknya meningkatkan konsentrasi tegangan pada tanah. Tiga metode yang akan digunakan untuk mengevaluasinya adalah dua metode yang digagas Priebe (1995), metode yang digagas Baez dan Martin (1993) yang akan menurunkan nilai CSR dan metode Baez (1995) yang akan menaikkan nilai CRR.

Persamaan faktor perbaikan yang diusulkan Priebe (1995) dapat dinyatakan n_0 seperti ditunjukkan persamaan 28.

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \cdot \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4 \cdot K_{ac} \cdot \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (28)$$

n_0 = initial improvement factor
 A_c = luas penampang *stone column*
 A = luas penampang *grid*
 K_{ac} = Koefisien tekanan tanah aktif

$$K_{ac} = \tan^2(45^\circ - \phi_c/2) \quad (29)$$

ϕ_c = sudut geser material *stone column*

Material pengisi kolom yang sudah padat akan tetap mengalami pemampatan. Karena itu, setiap beban yang menyebabkan penurunan tidak dibarengi dengan penggelembungan pada kolom. Dengan $\mu_s = 1/3$, maka rumusan $(A_c/A)_1$ seperti ditunjukkan persamaan 30.

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 2) + 5}{2 \cdot (4 \cdot K_{ac} - 1)} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left[\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 2) + 5}{4 \cdot K_{ac} - 1}\right]^2 + \frac{16 \cdot K_{ac} \cdot (n_0 - 1)}{4 \cdot K_{ac} - 1}} \quad (30)$$

$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1$ = rasio luasan akibat kompresi pada kolom

Nilai $\left(\frac{A_c}{A}\right)_1$ yang diambil adalah nilai yang positif dan lebih kecil. Sebagai pendekatan, kemampatan pada material kolom dapat diperhitungkan dengan mereduksi nilai dari faktor perbaikan (n_1) seperti ditunjukkan persamaan 31.

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \cdot \left[\frac{\frac{1}{2} + f\left(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A}\right)}{K_{ac} \cdot f\left(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A}\right)} - 1 \right] \quad (31)$$

$$f\left(\mu_s, \frac{\bar{A}_c}{A}\right) = \frac{(1 - \mu_s) \cdot \left(1 - \frac{\bar{A}_c}{A}\right)}{1 - 2\mu_s + \frac{\bar{A}_c}{A}} \quad (32)$$

μ_s = poisson ratio

$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (33)$$

$$\Delta\left(\frac{A}{A_c}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A_c}{A}\right)_1} - 1 \quad (34)$$

Seperti yang telah dijelaskan pada analisis likuifaksi dengan metode *simplified seed*, potensi likuifaksi ditentukan oleh CSR. Untuk mengestimasi secara kasar efisiensi *stone column* ini akan mengurangi nilai CSR akibat gempa dengan dinyatakan dengan faktor α seperti ditunjukkan persamaan 35.

$$\alpha = \frac{1}{n_1} \quad (35)$$

Nilai reduksi ini dinilai sudah cukup untuk menilai performa dari *stone column*. Namun, dari aspek mekanika tanah persamaan tersebut dianggap belum terbukti dan masih membutuhkan verifikasi lebih mendalam melalui percobaan dan pengumpulan data terhadap mitigasi menggunakan *stone column* di seluruh dunia.

Pada metode Baez & Martin (1993), asumsi dasar pada evaluasi terhadap distribusi tegangan didasarkan atas kekakuan dari masing-masing elemen, bahwa *shear strains* antara material yang diperbaiki dan material isi sama (Byrne, 1992). Asumsi tersebut dianggap valid karena pembebanan pada *stone column* tidak akan menyebabkan perpindahan (*displacement*) pada arah tertentu selain akibat pergerakan dari tanah. Maka dari itu, dapat digunakan persamaan 36.

$$\gamma_s = \gamma_{sc} \quad (36)$$

$$\frac{\tau_s}{G_s} = \frac{\tau_{sc}}{G_{sc}} \quad (37)$$

dimana:

- γ_s = shear strain pada tanah
- γ_{sc} = shear strain pada stone column
- τ_s = shear stress pada tanah
- G_s = shear modulus pada tanah
- τ_{sc} = shear stress pada stone column
- G_{sc} = shear modulus pada stone column.

Dengan mengasumsikan pendekatan sederhana menggunakan hubungan antara gempa dan tegangan geser (Seed and Idriss, 1971), didapatkan

$$\tau A \approx \tau_s A_s + \tau_{sc} A_{sc} \quad (38)$$

$$\tau = \text{shear stress} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_o r_d$$

- A = luas area total per unit = $A_s + A_{sc}$
- A_s = luas area tanah per unit
- A_{sc} = luas area stone column

$$\text{Replacement ratio: } A_r = \frac{A_{sc}}{A}$$

$$\text{Modulus ratio: } G_r = \frac{G_{sc}}{G_s}$$

$$\tau_{sc} = \frac{\tau}{\left[A_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r) \right]} \quad (39)$$

$$\tau_s = \frac{1}{G_r} \tau_{sc} \quad (40)$$

Untuk mengakomodasi efek dari stone column terhadap tegangan geser antara tanah dan stone column, dan mitigasi terhadap likuifaksi digagas faktor reduksi (K_G).

$$K_G = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{CSR_1}{CSR} \quad (41)$$

CSR_1 = cyclic stress ratio baru.

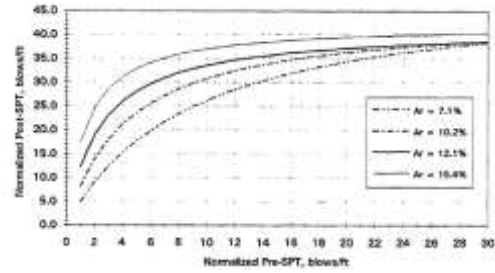
Didapatkan rumus praktis K_G :

$$K_G = \frac{1}{G_r \left[A_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r) \right]} \quad (42)$$

Nilai K_G yang didapatkan akan mereduksi nilai CSR sehingga nilai dari SF akan turun sedemikian rupa sehingga potensi likuifaksi yang akan terjadi dapat dimitigasi.

Metode Baez (1995) akan menghitung pengaruh stone column terhadap berubahnya kepadatan tanah yang berakibat nilai SPT yang berubah dan menaikkan

nilai CRR. Dalam analisis secara kuantitatif digunakan nilai CRR yang merupakan hasil dari nilai SPT. Kemudian digagas sebuah grafik hubungan antara pre dan post nilai SPT berdasarkan data empiris seperti ditunjukkan Gambar 6.



Gambar 6. Pre vs Post-SPT berdasarkan data empiris (Baez, 1995)

Berdasarkan hasil regresi tersebut dibuatlah sebuah persamaan yang dapat digunakan untuk berbagai nilai A_r seperti ditunjukkan oleh persamaan 43 yang diturunkan dari rumusan 44.

$$y = \frac{x}{0.776e^{-20.61A_r} + (0.025 - 0.0194e^{-20.61A_r})x} \quad (44)$$

$$A_r = -\frac{1}{20.61} \ln \left(\left(\frac{x}{0.776 - 0.0194x} \right) \left(\frac{1}{y} - 0.025 \right) \right) \quad (45)$$

dimana:

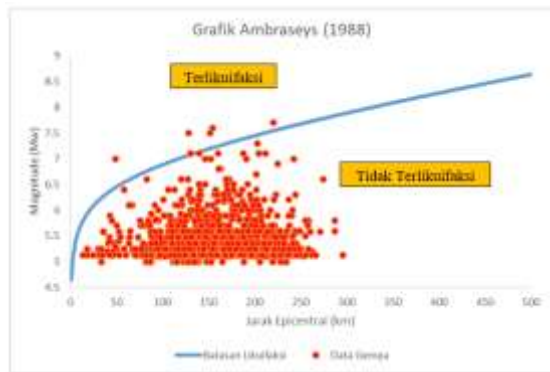
y = Post-SPT

x = Pre-SPT

Dengan mendapatkan nilai SPT baru akibat pengaruh stone column dapat dihitung nilai CRR kembali, sehingga didapatkan nilai CRR yang berbeda dan FS yang berbeda pula.

Hasil dan Analisis

Analisis potensi likuifaksi secara historis menggunakan data-data dari masa lalu yang diolah sehingga didapatkan kurva likuifaksi berdasarkan kekuatan gempa dan jarak lokasi terjadinya likuifaksi dengan episenter. Nilai jarak episentral dan nilai magnitudo momen diplotkan ke dalam grafik Ambraseys (1988) dan hasil tersebut dapat dilihat pada **Gambar 7**. Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa tanah pada lokasi studi memiliki potensi terlikuifaksi.



Gambar 7. Plot data gempa dibandingkan dengan plot grafik Ambraseys (1988)

Pada Laporan Akhir Revisi Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kepulauan Tidore 2010-2030 (BAPPENAS, 2010) disebutkan bahwa tanah di kepulauan Tidore secara umum merupakan dataran tanah yang bersifat alluvial. Disebutkan pula batuan yang ada terbentuk dari gunung api pada masa holosen. Endapan tanah di Tidore merupakan endapan jaman holosen baru dan semua tanah yang dianalisis merupakan tanah jenuh, karena muka air tanah berada berkisar 1-3 meter diatas muka tanah. Dapat disimpulkan berdasarkan kriteria geologis, tanah di Kepulauan Tidore berpotensi terjadi likuifaksi berdasarka kriteria geologis.

Selain dengan data historis, analisis likuifaksi secara kualitatif dapat dilakukan dengan melihat dari karakteristik tanahnya berdasarkan data yang telah didapatkan. Hasil analisis potensi likuifaksi secara kualitatif berdasarkan kriteria karakteristik tanah ditunjukan Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Kriteria Karakteristik Tanah

No Borlog	Depth	Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index	Kadar air	Indeks Likuiditas	Fines Content (%)	L/TL
1 BH-01	1.00 - 1.50	27.4	23.35	4.05	34.20	2.68	46.07	TL
2 BH-01	3.00 - 3.50	33.50	21.67	11.830	41.82	1.70	45.60	TL
3 BH-01	5.00 - 5.50	31.00	26.24	4.760	33.55	1.54	53.70	TL
4 BH-01	7.00 - 7.50						0.00	L
6 BH-02	1.00 - 1.50	47.00	25.70	21.300	54.83	1.37	74.00	TL
7 BH-02	3.00 - 3.50	39.00	27.92	11.080	45.49	1.59	57.60	TL
8 BH-02	7.00 - 7.50	39.00	28.88	10.120	52.94	2.38	37.70	TL
9 BH-02	9.00 - 9.50						33.90	TL
10 BH-03	5.00 - 5.50	180.50	60.85	119.650	233.29	1.44	34.80	TL
11 BH-03	2.50 - 3.00	39.00	27.92	11.080	48.68	1.87	44.30	TL
12 BH-03	4.50 - 5.00	39.00	26.08	12.920	48.68	1.75	62.10	TL
13 BH-03	6.50 - 7.00						31.00	TL
14 BH-04	4.50 - 5.00	44.00	25.67	18.330	51.33	1.40	66.40	TL
15 BH-04	6.50 - 7.00						41.50	TL
16 BH-05	1.00 - 1.50	35.00	22.48	12.52	37.88	1.23	52.80	TL
17 BH-05	3.00 - 3.50	50.00	33.01	16.99	67.87	2.05	62.40	TL
18 BH-05	5.00 - 5.50						31.50	TL
19 BH-05	9.00 - 9.50	44.00	31.57	12.43	41.70	0.81	69.80	TL
20 BH-06	1.00 - 1.50						0.00	L
21 BH-06	6.00 - 6.50						0.00	L
22 BH-06	8.00 - 8.50						0.00	L

Keterangan:

TL : Tidak mengalami likuifaksi

L : Mengalami Likuifaksi

■ : Data tidak diketahui

Berdasarkan hasil analisis tersebut tanah di lokasi studi berpotensi mengalami likuifaksi.

Dari analisis kualitatif yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa tanah di Kepulauan Tidore memiliki potensi likuifaksi. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis secara kuantitatif untuk mendapatkan potensi likuifaksi yang lebih terukur, sehingga penentuan mitigasi yang akan dilakukan menjadi lebih mudah.

Dalam melakukan analisis terhadap potensi terjadinya likuifaksi digunakan parameter perbandingan antara *cyclic stress ratio* (CSR) dan *cyclic resistance ratio* (CRR) dari tanah akibat terjadinya gempa. Hasil perhitungan CSR disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil perhitungan CSR

BH-1				
Depth		z (m)	Tipe Tanah	CSR
0.00	-	3.00	1.50 Soft Clay	-
3.00	-	5.00	4.00 Stiff Clay	-
5.00	-	10.00	7.50 Very Loose Sand	0.55
10.00	-	20.00	15.00 Medium Sand	0.48
BH-2				
Depth		z (m)	Jenis Tanah	CSR
0.00	-	3.50	1.75 Medium Clay	-
3.50	-	17.00	10.25 Very Soft Clay	-
17.00	-	19.00	18.00 Medium Sand	0.48
19.00	-	20.00	19.50 Dense Sand	0.46
BH-3				
Depth		z (m)	Jenis Tanah	CSR
0.00	-	3.50	1.75 Soft Clay	-
3.50	-	9.50	6.50 Soft Clay	-
9.50	-	15.00	12.25 Medium Sand	0.50
15.00	-	18.50	16.75 Dense Sand	0.45
18.50	-	20.00	19.25 Medium Sand	0.43
BH-4				
Depth		z (m)	Jenis Tanah	CSR
0.00	-	4.00	2.00 Medium Clay	-
4.00	-	9.00	6.50 Stiff Clay	-
9.00	-	12.00	10.50 Very Loose Sand	0.49
12.00	-	16.00	14.00 Loose Sand	0.49
16.00	-	20.00	18.00 Medium Sand	0.46
BH-5				
Depth		z (m)	Jenis Tanah	CSR
0.00	-	2.00	1.00 Stiff Clay	-
2.00	-	4.00	3.00 Very Soft Clay	-
4.00	-	6.00	5.00 Medium Clay	-
6.00	-	9.50	7.75 Hard Clay	-
9.50	-	13.50	11.50 Medium Sand	0.47
13.50	-	20.00	16.75 Very Dense Sand	0.42
BH-6				
Depth		z (m)	Jenis Tanah	CSR
0.00	-	6.00	3.00 Medium Sand	0.52
6.00	-	9.00	7.50 Very Loose Sand	0.51
9.00	-	11.00	10.00 Medium Sand	0.51
11.00	-	13.00	12.00 Very Dense Sand	0.49
13.00	-	15.00	14.00 Loose Sand	0.47
15.00	-	19.00	17.00 Medium Sand	0.45
19.00	-	20.00	19.50 Loose Sand	0.43

Sedangkan hasil perhitungan CRR dan FS ditunjukkan oleh Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Perhitungan CRR Dan FS

Depth		Tipe Tanah	(N1)60	CRR	CSR	FS	TL/L
BH-1							
0.00	-	3.00	Soft Clay	5.10	-	-	TL
3.00	-	5.00	Stiff Clay	17.68	-	-	TL
5.00	-	10.00	Very Loose Sand	4.16	0.07	0.55	L
10.00	-	20.00	Medium Sand	10.16	0.11	0.48	L
BH-2							
0	-	3.5	Medium Clay	8.93	-	-	TL
3.5	-	17	Very Soft Clay	1.93	-	-	TL
17	-	19	Medium Sand	11.39	0.12	0.48	L
19	-	20	Dense Sand	35.89	1.40	0.46	TL
BH-3							
0	-	3.5	Soft Clay	5.10	-	-	TL
3.5	-	9.5	Soft Clay	4.07	-	-	TL
9.5	-	15	Medium Sand	12.25	0.13	0.50	L
15	-	18.5	Dense Sand	32.42	0.70	0.45	TL
18.5	-	20	Medium Sand	21.50	0.23	0.43	L
BH-4							
0.00	-	4.00	Medium Clay	7.65	-	-	TL
4.00	-	9.00	Stiff Clay	12.70	-	-	TL
9.00	-	12.00	Very Loose Sand	3.04	0.07	0.49	L
12.00	-	16.00	Loose Sand	5.62	0.09	0.49	L
16.00	-	20.00	Medium Sand	16.12	0.16	0.46	L
BH-5							
0	-	2	Stiff Clay	16.58	-	-	TL
2	-	4	Very Soft Clay	2.55	-	-	TL
4	-	6	Medium Clay	10.01	-	-	TL
6	-	9.5	Hard Clay	41.65	-	-	TL
9.5	-	13.5	Medium Sand	28.50	0.39	0.47	L
13.5	-	20	Very Dense Sand	79.89	0.6	0.42	TL
BH-6							
0	-	6	Medium Sand	20.40	0.16	0.52	L
6	-	9	Very Loose Sand	2.72	0.07	0.51	L
9	-	11	Medium Sand	14.44	0.14	0.51	L
11	-	13	Very Dense Sand	60.89	0.60	0.49	TL
13	-	15	Loose Sand	5.41	0.09	0.47	L
15	-	19	Medium Sand	9.91	0.12	0.45	L
19	-	20	Loose Sand	5.20	0.09	0.43	L

Setelah dilakukan analisis potensi likuifaksi dengan metode *Simplified Seed* terdapat sebagian lapisan yang mengalami likuifaksi dan tidak mengalami likuifaksi, maka dari itu untuk memitigasi likuifaksi diperlukan evaluasi terhadap potensi terjadinya likuifaksi. Hasil perhitungan LPI untuk masing-masing zona borlog disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil perhitungan LPI

Zona	LPI	Indeks Kerusakan
BH-1	7.30	Sedang
BH-2	0.74	Rendah
BH-3	3.54	Rendah
BH-4	7.18	Sedang
BH-5	0.73	Rendah
BH-6	18.62	Tinggi

Berdasarkan evaluasi menggunakan LPI dinyatakan bahwa semua zona berpotensi beresiko terhadap likuifaksi, maka dari itu perlu dilakukan tindakan mitigasi untuk menghindari terjadinya kerusakan akibat likuifaksi. Dengan metode *probability of ground failure* tingkat kedalaman tanah yang harus diperbaiki untuk masing-masing zona seperti tertera pada Tabel 11.

Tabel 11. Lapisan Tanah Yang Perlu Diperbaiki Pada Masing-Masing Zona

Zona	Lapisan Berpotensi Likuifaksi	Lapisan yang perlu diperbaiki	Tebal (m)
BH-1	5.00 - 20.00	5.00 - 10.00	5
BH-2	17.00 - 20.00	Tidak Ada	-
BH-3	9.50 - 20.00	Tidak Ada	-
BH-4	9.00 - 20.00	9.00 - 12.00	3
BH-5	9.50 - 20.00	Tidak Ada	-
BH-6	0.00 - 20.00	0.00 - 15.00	15

Berdasarkan evaluasi tersebut kedalaman tanah yang harus diperbaiki adalah 15 meter.

Metode *vibroreplacement* dapat digunakan untuk memperbaiki tanah dengan kedalaman hingga 30 meter sehingga dapat digunakan. *Dynamic compaction* hanya memiliki rentang perbaikan 9-12 meter sehingga tidak dapat digunakan untuk memperbaiki tanah dengan kedalaman 15 meter. *Compaction grouting* tidak dapat digunakan untuk memperbaiki tanah di dekat permukaan dikarenakan *overburden pressure* yang rendah pada daerah permukaan dikhawatirkan tidak dapat menahan tekanan yang dihasilkan pada saat *grouting*. Metode *soil mixing* memenuhi kriteria kedalaman, namun metode ini cenderung dihindari karena tembok campuran hasil *mixing* cenderung mengalami keretakan saat terjadi gempa. Metode *soil replacement* tidak dapat dilakukan karena keterbatasan kedalaman. Dapat diambil kesimpulan bahwa metode yang digunakan untuk mitigasi likuifaksi dalam studi ini adalah *vibroreplacement* (*stone column*)

Dalam proses mendesain *stone column* direpresentasikan oleh Ar yang ditunjukkan Tabel 12.

Tabel 12. Rangkuman nilai Ar

D=1 m	Equilateral Triangular	Square
Spasi (m)	Ar	Ar
3	0.101	0.087
2.9	0.108	0.093
2.8	0.116	0.100
2.7	0.124	0.107
2.6	0.134	0.116
2.5	0.145	0.125
2.4	0.157	0.136
2.3	0.171	0.148
2.2	0.187	0.162
2.1	0.206	0.178
2	0.227	0.196
1.9	0.251	0.217
1.8	0.280	0.242
1.7	0.314	0.271
1.6	0.354	0.306
1.5	0.403	0.348
1.4	0.463	0.399

Evaluasi performa *stone column* dengan metode Priebe menggunakan parameter Ar (ditunjukkan Tabel 12) dan ϕ_c (sudut geser *stone column*) yang digunakan 45° .

Hasil perhitungan nilai α yang didapatkan dari masing-masing kombinasi Ar ditunjukkan Tabel 13 dan hasil analisis *performance* untuk masing-masing zona ditunjukkan oleh Tabel 14 dan Tabel 15.

Tabel 13. Hasil Perhitungan Nilai α

D=1 m	Equilateral Triangular		Square	
Spasi (m)	Ar	α	Ar	α
3	0.10	0.56	0.09	0.61
2.9	0.11	0.54	0.09	0.59
2.8	0.12	0.52	0.10	0.56
2.7	0.12	0.50	0.11	0.54
2.6	0.13	0.47	0.12	0.52
2.5	0.15	0.44	0.13	0.49
2.4	0.16	0.42	0.14	0.47
2.3	0.17	0.39	0.15	0.44
2.2	0.19	0.36	0.16	0.41
2.1	0.21	0.32	0.18	0.37
2	0.23	0.29	0.20	0.34
1.9	0.25	0.25	0.22	0.30
1.8	0.28	0.21	0.24	0.26
1.7	0.31	0.17	0.27	0.22
1.6	0.35	0.13	0.31	0.18
1.5	0.40	0.08	0.35	0.13
1.4	0.46	0.03	0.40	0.08

Tabel 14. Rangkuman evaluasi masing-masing konfigurasi dengan metode Priebe (1995) pada masing-masing zona dengan *pattern Equilateral Triangular*

D=1 m	Equilateral Triangular																
Zona	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
BH1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL		
BH4	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	
BH6	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	

Tabel 15. Rangkuman evaluasi masing-masing konfigurasi dengan metode Priebe (1995) pada masing-masing zona dengan *pattern Square*

D=1 m		Square															
Zona	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
BH1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	
BH4	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL
BH6	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL

Disimpulkan dengan evaluasi metode Priebe (1995) konfigurasi desain *stone column* yang optimum dengan spasi 1.6 meter dan diameter 1 meter dengan *pattern equilateral triangular*.

Evaluasi performa *stone column* metode Baez & Martin (1993) menggunakan parameter Gr yaitu perbandingan antara modulus geser *stone column* dan modulus geser tanah.

Hasil analisis *performance* untuk masing-masing zona ditunjukkan oleh Tabel 16 dan Tabel 17.

Tabel 16. Rangkuman evaluasi masing-masing konfigurasi dengan metode Baez & Martin (1993) pada masing-masing zona dengan *pattern Equilateral Triangular*

Longitudinal Equilateral Triangular																	
D=1 m	Equilateral Triangular																
Zona	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
BH1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL		
BH4	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL			
BH6	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL		

Tabel 17 Rangkuman evaluasi masing-masing konfigurasi dengan metode Baez & Martin (1993) pada masing-masing zona dengan *pattern Square*

D=1 m		Square															
Zona	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4
BH1	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	
BH4	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	
BH6	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	

Disimpulkan dengan evaluasi metode Baez & Martin (1993) konfigurasi desain *stone column* yang optimum dengan spasi 1.6 meter dengan diameter 1 meter, dengan *pattern equilateral triangular*.

Evaluasi performa *stone column* dengan metode Baez (1995) akan menghitung pengaruh *stone column* terhadap berubahnya kepadatan tanah yang berakibat nilai SPT yang berubah dan menaikkan nilai CRR. Digunakan persamaan 44 yang didapatkan dari regresi data empiris yang

merupakan hubungan antar nilai SPT sebelum dan sesudah adanya *stone column*. Hasil beserta simpulan performa masing-masing konfigurasi disajikan pada Tabel 18.

Tabel 18. Rangkuman evaluasi masing-masing konfigurasi dengan metode Baez (1995) pada masing-masing zona

D=1 m	Equilateral Triangular											Square										
Zona	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2
BH1	L	L	L	L	L	L	L	TL				L	L	L	L	L	L	L	L	TL		
BH4	L	L	L	L	TL							L	L	L	L	L	L	TL				
BH6	L	L	L	L	L	L	L	L	TL			L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL

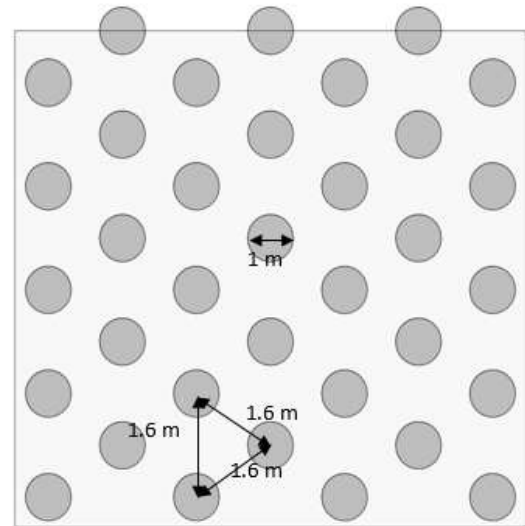
Disimpulkan dengan evaluasi metode Baez (1995) konfigurasi desain *stone column* yang optimum dengan spasi 2.2 meter dengan diameter 1 meter, dengan *pattern equilateral triangular*.

Dengan menggunakan tiga metode evaluasi didapatkan hasil desain seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 19.

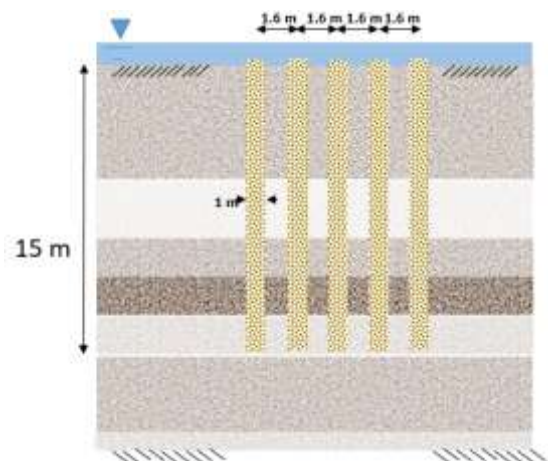
Tabel 19. Rangkuman Hasil Evaluasi Tiga Metode

Zona	Spasi (m)					
	Priebe (1995)		Baez & Martin (1993)		Baez (1995)	
	Equilateral Triangular	Square	Equilateral Triangular	Square	Equilateral Triangular	Square
BH1	1.6	1.5	1.6	1.5	2.3	2.2
BH4	1.6	1.5	1.7	1.5	2.6	2.4
BH6	1.6	1.5	1.6	1.5	2.2	2.1

Dari ketiga metode tersebut menunjukkan bahwa jenis *pattern equilateral triangular* yang menghasilkan spasi antar *stone column* yang lebih efisien dibandingkan jenis *pattern square*. Sedangkan apabila membandingkan ketiga metode tersebut saat evaluasi terhadap desain *stone column* dapat dilihat bahwa dengan metode Priebe (1995) dan metode Baez & Martin (1993) hasilnya tidak jauh berbeda dan cenderung tidak lebih konservatif dibandingkan metode Baez (1995) yang menghasilkan spasi yang lebih renggang. Namun, pada studi ini akan dipilih spasi antar *stone column* yang paling konservatif yang memiliki spasi paling rapat yaitu metode Priebe (1995) dengan diameter 1 meter, spasi 1.6 meter, dengan jenis *pattern equilateral triangular*. Ilustrasi untuk desain tersebut ditunjukkan oleh Gambar 8 tampak atas dan Gambar 9 untuk tampak samping.



Gambar 8. Tampak atas (*layout*) desain *stone column*



Gambar 9. Tampak samping desain *stone column*

Simpulan dan Saran

Kesimpulan yang dapat diambil dari proses pengerjaan tugas akhir ini antara lain:

1. Analisis kualitatif menunjuka tanah di lokasi studi berpotensi likuifaksi dan dilakukan analisis secara kuantitatif.
2. Analisis secara kuantitatif menunjukan tanah di lokasi studi berpotensi likuifaksi.
3. Evaluasi menggunakan kriteria LPI menunjukan bahwa semua zona berpotensi mengalami likuifaksi.
4. Dengan pendekatan *probability ground failure* didapatkan kedalaman yang harus diperbaiki adalah 15 meter.

5. Diperlukan mitigasi berupa *stone column* untuk menghindari potensi terjadinya likuifaksi.
6. Digunakan tiga metode untuk menentukan desain *stone column* yang paling optimal yaitu metode Priebe (1995), Baez & Martin (1995), dan Baez (1993).
7. Berdasarkan ketiga metode tersebut *pattern equilateral triangular* lebih efisien digunakan daripada *pattern square* karena menghasilkan spasi yang lebih kecil.
8. Dengan metode Priebe (1995) dan metode Baez & Martin (1995) konfigurasi desain *stone column* yang didapatkan dengan spasi 1.6 meter dan diameter 1 meter dengan *pattern equilateral triangular*.
9. Dengan metode Baez (1993) konfigurasi desain *stone column* yang didapatkan dengan spasi 2.2 meter dan diameter 1 meter dengan *pattern equilateral triangular*.
10. Dari ketiga metode evaluasi untuk desain *stone column* dapat dilihat bahwa desain yang dapat digunakan menggunakan metode Priebe (1995) dengan diameter 1 meter, spasi 1.6 meter, dengan jenis *pattern equilateral triangular*.

Beberapa saran untuk menjadikan studi ini menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Data yang diperlukan untuk memperkuat analisis kualitatif seperti grafik *grain size distribution* sebaiknya ditambahkan juga agar analisis yang dilakukan lebih teliti.
2. Data yang dipakai seperti data *borehole log* dan data SPT harus diperbanyak, sehingga hasil yang didapatkan menjadi lebih baik.
3. Dalam proses desain *stone column* dapat ditambah metode evaluasinya seperti menggunakan metode elemen hingga untuk menambah keakuratan analisis yang dilakukan.

Referensi

- Ambraseys, N. N. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (pp. 1-105).
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT, SNI 4153:2008*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung. SNI-1726-2012: Departemen Perencanaan Umum*.
- Baez, J. I. (1995). *A Design Model for the Reduction of Soil Liquefaction by Vibro-Stone Columns*. California: University of Southern California.
- Baez, J. I., & Martin, G. (1993). Advances in the Design of Vibro System for the Improvement of Liquefaction Resistance.
- Bo, M. W., & Choa, V. (2004). *Reclamation and Ground Improvement*. Singapore: Thomson Asia Pte Ltd.
- Bureau of Indian Standards. (2003). *IS 15284-1 : Design and Construction for Ground Improvement - Guidelines, Part 1: Stone Columns*. New Delhi.
- Das, B. M. (1985). *Principle of Geotechnical Engineering*. USA: PWS Publisher.
- Goughnour, R. R., & Barksdale, R. D. (1984). Performance of a Stone Column Supported Embankment. *First International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Missouri: Missouri University of Science and Technology Scholars' Mine.
- Hayward Baker Grouting. (n.d.).
- Housner, G. W. (1985). *Liquefaction of Soils during Earthquakes*. Washington DC: National Academy Press.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2010). *SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures*. California: Center of

Geotechnical Modeling, University of California .

- Kementerian PPN/Bappenas. (2010). *Laporan Akhir Revisi Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Tidore Kepulauan 2010-2030*.
- Kramer , S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Li, D. K., Juang, H. J., & Andrus, R. D. (2006). Liquefaction Potential Index: A Critical Assessment Using Probability Concept. *Journal of GeoEngineering*, 11-24.
- Priebe, H. J. (1995). *The Design of Vibro Replacement*. Keller.
- Rao, L., & Madhira, M. (2010). Evaluation of Optimum Spacing of Stone Columns. *Indian Geotechnical Conference*. Mumbai.
- U.S. Department of Transportation. (1983). *Design and Construction of Stone Columns Vol.1*. Virginia.
- US Army Corps of Engineers. (1990). *Engineering and Design Settlement Analysis*.
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soil. *American Society of Civil Engineers*.